

# 岩盤構造物の特徴と岩盤物性評価

## Features of Rock-Structures and Rock Mass Properties Estimation

ひ び の  
日 比 野さとし  
敏\*

### 1. はじめに

地下発電所空洞や燃料地下備蓄空洞などの大規模空洞建設に際して、岩盤はその構成主体となる。鉄道や道路用トンネルあるいはコンクリートダム等においては、コンクリートと岩盤が主たる構成要素として活用される。これらの構造物はいずれも岩盤を構成要素にしているという意味において、ここでは「岩盤構造物」と総称することにする。

岩盤構造物においては、当然のことながら、岩盤の特性を考慮して設計・施工が行われる必要がある。最近の岩盤力学のめざましい発展により、岩盤の物性などもかなり解明されてきたが、我が国においては激しい地殻変動の影響を受けて地質は複雑となっており、岩盤の特性も複雑で今後解明を要する事項も多々存在しているように思われる。そこで、以下においては岩盤構造物の二、三の特徴、岩盤物性評価上の問題点に触れ、さらに今後の地下開発およびそれに伴い必要となる物性について述べてみたい。

### 2. 岩盤構造物の特徴

#### 2.1 「材料」としての岩盤の特徴

岩盤構造物の建造に際してはその構成「材料」として「岩盤」を用いることになる。コンクリートや鉄材などのような人工的材料と異なり、岩盤は天然の産物であるために種々の特徴を有しており、以下にその二、三について述べる。

前述したように、日本列島は過去に激しい地殻変動を受け岩盤はもまれており、また同一種類の岩盤が広く分布するというよりは異種の岩盤が混在し、風化程度も場所により変化しているのが普通である。岩種が異なり風化程度も違えばその物性も変化し、岩盤は「非均質」となる。大規模地下空洞やダムの基礎を例にとれば、2～3種類以上の岩盤がそれぞれ岩級も異なりながら分布することがあり、数種の非均質岩盤材料で岩盤構造物を築造することになる。

次に、岩盤には各種の不連続面が存在している。例えば花崗岩を例にとれば、微細な不連続面として rift 面, grain 面, hardway 面<sup>1),2)</sup> などがあり、ついでより明りょうな不連続面として節理を挙げることができる。大規模な不連続面としてはシーム、破碎帯や断層等がある。岩盤はこれらの不連続面により「不連続体」としての特性を有し、不連続面の規模・性状によっては応力の伝達も断続的となり、

変形も不連続となったり異方的な性質を示したりする。

断層等の大規模な不連続面は、その本数にもよるが、その分布や性状を個別に調査し、岩盤構造物の設計・施工時に個々に考慮する場合が多い。一方、小規模な不連続面の節理の場合には個数が極めて多く、その評価に際して個々に扱うことはまれで、統計的な手法などを用いたりする。節理の発達は、堆積岩系統の岩盤よりは火成岩系統の岩盤においてより顕著な場合が多く、変形性や強度などに強く影響する。例えば岩石供試体の強度と岩盤の強度を比べると、後者は前者の約1割にしか過ぎなかった<sup>3)</sup> というのは極端な例ではあるが、節理等不連続面が岩盤物性に大きく影響することを示している。

このような不連続面を内包した岩盤は当然の結果として「非線型な変形特性」を示す。図-1には平板載荷試験によって得られた荷重-変形曲線の例を示す。変形特性は荷重強度の大小により異なるほか、荷重が増加と減少のどちらの過程にあるかによっても違い、さらに繰り返し載荷することによって変形量は増大している。

上述したように岩盤は材料としてみた場合、程度の差こそあれ非均質、不連続、非線型な特質を備えており、人工的な材料とはかなり異なっているのが特徴である。

#### 2.2 我が国における初期地圧の傾向

大規模空洞を建設する場合を考えると、空洞を構成する

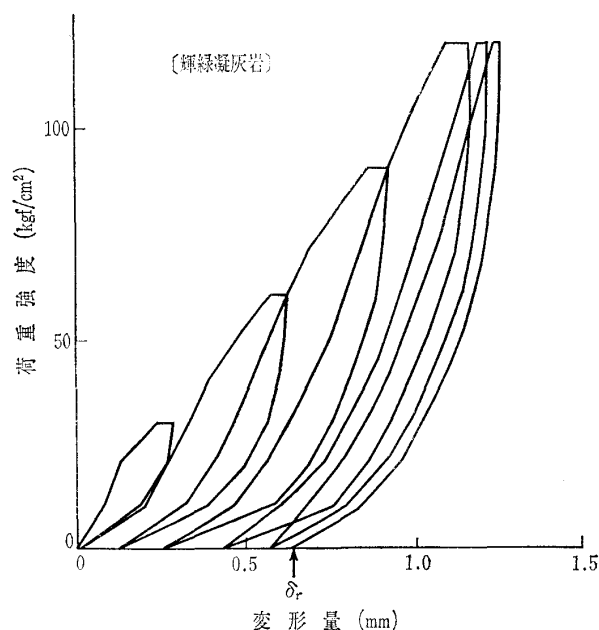


図-1 岩盤の非線型な変形特性の例（平板載荷試験による荷重・変形曲線）

\* (財)電力中央研究所 我孫子研究所 専門役

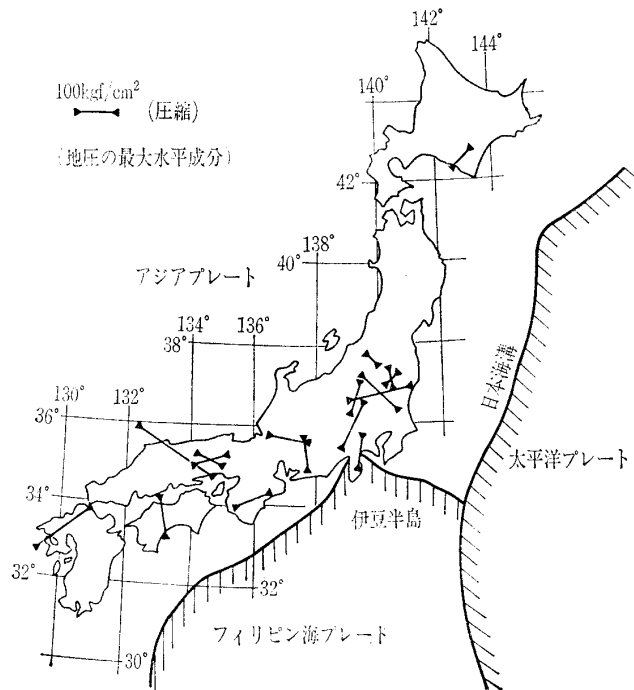
## 総 説

「材料の岩盤」に対し、作用する「外力」は地圧が原因となっている。つまり、空洞を掘削して空洞を順次形成してゆくに際しては、掘削面に作用している地圧相当分の外力を掘削面に与える必要がある<sup>4)</sup>。したがって岩盤構造物の力学的安定性評価においては、材料としての岩盤の物性と外力の主因となる地圧が最も基本的な要素となる。

初期地圧はこれまで日本列島の各所において応力解放法などにより求められ、それらの結果によれば著しい特徴を示している。つまり、表一1の実測結果<sup>5)</sup> およびその結果の一部を示した図一2によれば、地殻変動の影響を反映して、水平成分は鉛直成分よりも大きく、側圧比が1以上の場合が多いことを示している。弾性理論等を用いて岩盤自重による初期地圧を求めると、側圧比は1以下となり実測値の傾向とは大きく異なってくる。地下深部で地圧の比較的大きいところで岩盤構造物を建設する場合には、外力相当分としての地圧の測定が非常に重要であることが分かる。

### 2.3 岩盤構造物の安定性と不連続面との関係

岩盤の物性と地圧条件が同じであっても、岩盤構造物の規模によって安定性は異なってくる。例えば小断面の横坑では無支保でも安定しているのに、大断面空洞の掘削となると支保を施しても崩壊を来すことがある。この原因の一つとしては岩盤の不連続面が影響している場合が多い。大規模な不連続面である断層等の場合には、岩盤構造物が大きい場合にも小さい場合にも、それ相応の注意を断層に払うものであるが、小規模な不連続面である節理等の場合には配慮を忘れがちである。岩盤構造物がより大きくなるほどその影響が大きくなるので注意する必要がある。このことは空洞掘削や斜面掘削の時により顕著で、掘削自由面が大きくなるほど節理等の不連続面の影響は連鎖的に作用



図一2 地圧の最大水平成分の大きさと作用方向の分布 (測定方法: オーバーコアリングによる応力解放法)<sup>5)</sup>

表一1 我が国における初期地圧の測定結果<sup>5)</sup>

| 地点<br>No. | 岩盤の種類   | 主 応 力<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) |            |            | 水 平 鉛 直<br>成 分 成 分<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) |            | 比 率  |
|-----------|---------|---------------------------------|------------|------------|----------------------------------------------|------------|------|
|           |         | $\sigma_1$                      | $\sigma_2$ | $\sigma_3$ | $\sigma_{Hmax}$                              | $\sigma_v$ |      |
| 1         | 花 崗 岩   | 108                             | 64         | 0          | 106                                          | 60         | 1.77 |
| 2         | 頁 岩     | —                               | —          | —          | 90                                           | 73         | 1.24 |
| 3         | 花 崗 岩   | 96                              | 75         | 49         | 79                                           | 92         | 0.86 |
| 4         | 黒 色 片 岩 | 111                             | 54         | 37         | 87                                           | 72         | 1.22 |
| 5         | 花 崗 岩   | 234                             | 132        | 72         | 202                                          | 125        | 1.61 |
| 6         | 泥 岩     | 12.4                            | 10.8       | 107        | 11.6                                         | 11.7       | 0.99 |
| 7         | 緑 色 片 岩 | 8.9                             | 6.6        | 4.6        | 7.7                                          | 7.1        | 1.10 |
| 8         | 流 紋 岩   | 42                              | 33         | 25         | 40                                           | 29         | 1.37 |
| 9         | 花 崗 岩   | 158                             | 111        | 63         | 155                                          | 112        | 1.39 |
| 10        | 輝緑凝灰岩   | 62                              | 48         | 47         | 62                                           | 48         | 1.29 |
| 11        | 珪 質 砂 岩 | 157                             | 106        | 78         | 147                                          | 106        | 1.39 |
| 12        | 角 礫 岩   | 121                             | 85         | 76         | 114                                          | 91         | 1.24 |
| 13        | 礫 岩     | 82                              | 55         | 49         | 81                                           | 55         | 1.48 |
| 14        | 礫 岩     | 10.6                            | 7.2        | 4.1        | 9.2                                          | 5.5        | 1.68 |
| 15        | 石英せん緑岩  | —                               | —          | —          | 74                                           | 28         | 2.62 |
| 16        | 流 紋 岩   | 90                              | 62         | 46         | 89                                           | 52         | 1.72 |
| 17        | 泥 岩     | —                               | —          | —          | 4.9                                          | 5.5        | 0.89 |
| 18        | 花 崗 岩   | 55                              | 46         | 41         | 55                                           | 42         | 1.30 |
| 19        | 流 紋 岩   | 51                              | 43         | 17         | 44                                           | 50         | 0.88 |
| 20        | 凝灰角礫岩   | 50                              | 37         | 29         | 41                                           | 46         | 0.89 |
| 21        | ひ ん 岩   | 104                             | 70         | 41         | 87                                           | 58         | 1.51 |
| 22        | ひ ん 岩   | 89                              | 59         | 30         | 64                                           | 60         | 1.07 |
| 23        | 粘 板 岩   | 121                             | 79         | 55         | 121                                          | 69         | 1.76 |

する傾向があり配慮を要する。

以上岩盤構造物と岩盤物性の二、三の典型的な特徴について述べたが、岩盤物性の測定・評価に際しては上述した特性・特徴に対応できるよう配慮することが基本である。

## 3. 岩盤物性評価上の二、三の問題点

### 3.1 不連続面特性の測定法の開発

岩盤の不連続面特性の影響は顕著で、その特性評価が今後の重要な課題である。不連続面特性の測定手法としては、断層せん断試験(原位置)や節理面せん断試験(室内)などがある。しかしながら、後者の試験では完全に分離した節理面特性を求めており、この試験結果より実際の岩盤での断続的節理分布の特性を得ることは必ずしも容易でなく、今後さらに新しい試験法の開発が望まれる。

従来の平板载荷試験法や岩盤せん断試験法等では、不連続面の影響を込みにした形で岩盤物性を評価しており、これらの試験結果から不連続面の特性を抽出できれば、それも一つの評価法となりうる。平板载荷試験法を例にとれば、荷重-変形曲線(図一1)の残留変形量やヒステリシスカーブは、不連続面が断続的に分布した状態での特性を反映しており、それらの特性を抽出することが考えられる。不連続岩盤の特性が評価できれば、大規模な岩盤構造物を築造した場合、それら不連続面が安定性にいかなる形で影響するかを、解析的に検討することも可能になってくるのではないかと考えられる。

### 3.2 各種物性評価法の整備と基準化

岩盤物性評価法についてみると、その手法が基準化ない

し指針化されているものは数が少ない。わずかに、「平板載荷による原位置岩盤の変形試験法の基準<sup>6)</sup>」,「原位置岩盤のせん断試験—指針と解説—<sup>6)</sup>」などがあるが,地圧測定,水室試験等指針もないのが現状である。個々のサイトの特性に合わせて工夫・実施されているわけであるが,今後の岩盤力学進展の基盤として,各種岩盤物性評価法の整備が望まれる。

### 3.3 マクロな物性評価法の開発

現状の岩盤物性評価法の多くの手法は,岩盤構造物の規模から見た場合,いわば点としての評価法であるものが多い。一例として平板載荷試験法をみると,載荷板の直径は30~80 cm 程度であるのに対し,岩盤構造物の規模は地下発電所空洞でみれば幅約25m,高さ約50m,奥行き約100mとはるかに大きく,載荷板による岩盤の応答はまさに局所的である。第2節で述べたように,地質も変化し非均質な場合,当然平板載荷試験やせん断試験も地質の変化に応じて実施されるが,あくまでも点としての測定の域を出るものではない。

載荷時の点としての岩盤の挙動から求めた物性と,実際の施工時に岩盤構造物全体が広い広がりのある二次元の面あるいは三次元構造物として挙動する場合の物性とは,両者は必ずしも一致しないことが考えられる。このことを示唆する事例を一,二示すと次のようである。

まず最初の事例として,地下発電所建設地点において実施された,変形特性に関する各種試験結果の比較を図-3に示す。原位置試験の種類としては,平板載荷試験,岩盤三軸圧縮試験,水室試験であり,岩盤の種類は花崗岩の場合である。平板載荷試験についてみると,載荷板が1 m角の場合の弾性係数の値は約19万 kgf/cm<sup>2</sup>で,載荷板が直径30 cmの円板の場合の値の約1.7倍を示している。また水室試験では載荷面形状が平面ではないが,約21万 kgf/cm<sup>2</sup>となっており,平板載荷試験(30 cm 円板)の場合の約2倍の値となっている。

この例では載荷面が大きくなるにつれて弾性係数の値はより大きくなる傾向を示している。このような傾向の生ずる原因の一つとしては,載荷面積が大きくなると載荷の影響がより深部の岩盤にまで達し,応力解放により緩んだ岩盤表面の影響比率がより小さくなることが考えられる。

次にアーチダムの基盤で求めた弾性係数の例<sup>9)</sup>について示す。アーチダムでの湛水を荷重として,その時の基礎岩盤の変形を,岩盤内横坑に設置した測線長50~100mの岩盤変位計により測定し,ダム基盤のマクロな弾性係数を推定して約10万 kgf/cm<sup>2</sup>の値が得られた。この値は同地点で平板載荷試験(30 cm 円板)により求めた弾性係数の値2~3万 kgf/cm<sup>2</sup>の約3倍に相当する。この例の場合も前述の例と同様に,岩盤変位計は岩盤内部の変形特性を示し,水圧荷重の載荷面である岩盤表面の影響を受けていないことによるものと考えられる。

|              | 載荷時接線弾性係数 $E$ (10 <sup>4</sup> kgf/cm <sup>2</sup> ) |    |    |    |    | $E$ を求めた応力レベル(kgf/cm <sup>2</sup> ) |
|--------------|------------------------------------------------------|----|----|----|----|-------------------------------------|
|              | 10                                                   | 20 | 30 | 40 | 50 |                                     |
| 弾性波速度試験(供試体) |                                                      |    |    |    |    | (湿潤状態)                              |
| 岩石コア一軸圧縮試験   |                                                      |    |    |    |    | (湿潤状態)<br>$\sigma=0\sim100$         |
| 水 室 試 験      |                                                      |    |    |    |    | (水室直径2m)<br>$\sigma=20\sim30$       |
| 平板載荷試験(1m角)  |                                                      |    |    |    |    | $\sigma=50\sim60$                   |
| 岩盤三軸<br>圧縮試験 | 静水圧                                                  |    |    |    |    | $\sigma=50\sim75$                   |
|              |                                                      |    |    |    |    | $\sigma=80\sim100$                  |
| 平板載荷試験(30cm) |                                                      |    |    |    |    | $\sigma=50\sim60$                   |

図-3 各種の試験法より求めた弾性係数の相関の例  
(花崗岩の場合)

これらの例でみると,現状の岩盤表面に載荷する平板載荷試験による場合,岩盤構造物としてのマクロな岩盤の変形性を小さく見積もっている可能性を示しており,今後マクロな岩盤物性の測定手法を開発してゆく必要があると考えられる。また,上述したような測定例は数少なく,今後岩盤構造物を建造するに際しては,建造中あるいは建造後のマクロな岩盤挙動からマクロな岩盤物性を推定し,建造前の設計に用いた諸物性値との相互関係を再検討するとともに,この種のデーターを集積しマクロな岩盤物性評価に資することが望まれる。

岩盤の強度に関しても,マクロな視点からの評価が必要と思われるが,実際にはかなり困難である。岩盤せん断試験についてみても,載荷面積の大きさの影響を調査した例はほとんどない。またマクロな岩盤強度は岩盤斜面の崩壊事例などを分析することにより推定しようと思われるが,分析できる条件のそろった事例は数少ない。例えば石灰岩の斜面が30~40万 m<sup>3</sup> 崩壊し,その発生機構を検討するに際して岩盤の強度を想定した事例<sup>9)</sup>などは,この数少ない一つである。今後さらにこの種の事例を集積しマクロな岩盤強度の評価に資することが望まれる。

### 3.4 岩盤の不連続面の特性

岩盤の不連続面はこれまで述べてきたように,岩盤構造物に極めて大きな影響を及ぼす。そして不連続面に関する調査手法,物性評価や解析手法に関する研究も非常に盛んとなり,近年著しい発達を遂げつつあるが,この分野は岩盤力学の中でも比較的新しく,今後の研究がさらに必要である。ここでは不連続面の特性の一面を示していると思われる事例<sup>10)</sup>を次に紹介する。

地下発電所空洞掘削時に側壁の変形を測定したところ,空洞形状や初期地圧がほぼ左右対称であったにもかかわらず,山側と谷側の2つの側壁の変形には2~3倍の差が生じた。側壁岩盤の弾性係数はほぼ同じであったが,一方は角礫岩が主であるのに対し,他方は珪質砂岩が主であった。そこで原因解明のためにひずみ解放試験が実施された。つまり,岩盤面にスリットを入れ地圧解放時の岩盤のひずみを測ったところ,角礫岩のところでは珪質砂岩に比べ2.3

## 総 説

倍の解放ひずみが得られた。そしてこの原因としては、角礫岩の場合には、応力解放時に礫とマトリックスの境界などにマイクロクラックが発生する性質があることによると推定している。

また、ここ20年間に建設された数多くの地下発電所の大規模空洞掘削時の岩盤挙動の計測結果から、次のような傾向が分かっている<sup>11)</sup>。つまり、空洞側壁の変形量は、岩盤の種類が堆積岩系の場合に比べ火成岩系の場合には倍増する傾向がある。そしてその原因としては、火成岩系の場合には節理等の不連続面が開口しやすく、変形量の増大をもたらすことによる、という結果が得られている。

これらのことは、同じ岩盤の不連続面であっても、岩盤の種類によりその挙動や性質が異なることを示唆しているのではないと思われる。

通常観察する横坑壁面などの不連続面、例えば節理などは、掘削時の地圧解放により開口し、場合によってはマイクロクラックも発生し、岩盤は「不連続体」としての特性が顕在化した状態にある。一方、岩盤内部の地圧が未解放の段階では、不連続面もいわば「連続体」に近い挙動を示す可能性があり、地圧の解放は不連続面に対し非可逆的な作用となるのではないかと考えられる。

## 4. 今後の地下開発と岩盤物性評価

### 4.1 新しい岩盤構造物と岩盤物性

これまで各種の岩盤構造物が地上および地下に建設されてきたが、今後は地下開発がより一層その比重を増すものと思われる。地下の開発は、人口稠密な我が国において国土のより有効な利用や自然保護、景観に資するのみならず、これからは地下の特徴である断熱性、恒温恒湿性、隔離閉鎖性、耐震性、耐振動性、耐火耐爆性等の地下の有利性を活用して、経済性を向上させた新しい岩盤構造物の建設へと発展してゆくものと考えられる。

現在、地下活用施設として放射性廃棄物の処分、超電導エネルギー貯蔵、圧縮空気貯蔵、地下燃料備蓄、地下ダム、冷・熱水貯蔵、地下式原子力発電所などが考えられており、一部のものはすでに建設されている。しかしながら、これら岩盤構造物の建設に必要な岩盤の特性がすべて明らかになっているわけではない。

例えば、岩盤水理とでも言うか、地下岩盤内の地下水の分布や広域地下水流の挙動等は、節理や亀裂あるいは断層等の不連続面に支配され、それらの機構解明は今後にまっところが多い。また、岩盤としての吸着、吸収等の化学的特性や熱伝導、比熱特性あるいは高・低温下における各種物理的、力学的特性の解明が上述の新しい地下構造物の建設に際しては必要となり、それらの測定法の開発、評価手法の確立や基準化が望まれる。

### 4.2 深部岩盤物性調査法の開発

地下構造物の建設深度は今後従来よりもより深くなるも

のと思われる。例えば高レベル放射性廃棄物の地層処分では、地下500～1000m級の深さが予想される。このような深さになると、地下深部の情報をかなりな精度でもって地上より探査できるシステムを開発することが望まれる。遠隔操作により地中で任意の方向に掘進でき、しかも各種の調査、試験を行う探査機の開発や、地球物理学的、地化学的手法を用いた調査法等の開発がまたれる。

## 5. あとがき

岩盤構造物と岩盤物性についてごく概略を述べた。節理等の不連続面の特性が岩盤物性に影響を及ぼし、岩盤構造物の安定性にも大きく作用している。そして、これらを反映して最近不連続面に関しての研究が非常に盛んになってきている。

この不連続面は、我々が目にする岩盤表面では地圧等の解放により特性が強調され、いわば「顕在化」しているように思われる。一方、岩盤構造物は巨大な地山全体から構成されており、岩盤表面より内部の地圧も未解放の状態では不連続面も「潜在化」しており、その影響力は眠っていることが考えられる。したがって、岩盤構造物の建造に際しては、眠れる獅子を起こさないように、ということも一つの重要な岩盤力学上の配慮である。

## 参 考 文 献

- 1) 日本材料学会編：岩石力学とその応用，丸善，p. 4, 1966.
- 2) 工藤洋三・橋本堅一・中川浩二・佐野 修：花崗岩の力学的異方性と岩石組織欠陥の分布，土木学会論文集，No. 370/III-5, pp. 189～198, 1986.
- 3) 君島博次：岩盤の破壊特性に関する現地試験について，岩の力学国内シンポジウム，pp. 66～77, 1964.
- 4) 林 正夫・日比野敏：地下の開削に伴う地盤内の緩み領域の逐次の発達過程の解析法，第2回岩の力学国内シンポジウム講演集，pp. 69～74, 1967.
- 5) Kanagawa, T. et al.: In Situ Stress Measurements in the Japanese Islands: Over-coring Results from a Multi-element Gauge Used at 23 Sites, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 23, No. 1, pp. 29～39, 1986.
- 6) 土木学会編：原位置岩盤の変形およびせん断試験の指針—解説と設計への適用—，土木学会，1983.
- 7) 土質工学会編：土質工学ハンドブック，第13章 岩の力学，p. 441, 1982.
- 8) Hibino, S. et al.: Forecast and Measurement of the Behaviour of Rock Masses during Underground Excavation Works, Proc. of the Int. Symp. on Field Measurements in Rock Mechanics, Vol. II, pp. 935～948, A.A. Balkema, 1977.
- 9) 山口梅太郎・下谷高瀬，ほか：ある石灰石鉱山における斜面崩壊の事例について，日本鉱業会誌，Vol. 97, No. 1125, pp. 1～6, 1981.
- 10) 御牧陽一・松尾和俊：原位置岩盤におけるひずみ解放試験について，第17回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp. 106～110, 1985.
- 11) Hibino, S. et al.: Behaviour of Rocks around Large Caverns during Excavation, Proc. of the 5th Int. Cong. on Rock Mechanics, Melbourne, Vol. 2, pp. D199～202, 1983.

(原稿受理 1987.1.19)